

多因素影响下超高性能混凝土的自修复性能研究

王伟

北京妫川水务建设管理有限公司 北京 102100

DOI: 10.12238/ems.v7i6.13980

[摘要] 本文聚焦于多因素影响下超高性能混凝土(UHPC)自修复性能做深入研究,全面剖析原材料构成、环境状况、微观构造等要素对UHPC自修复性能的作用机理,采用实验研究跟理论分析相结合的方法,探寻各因素交互作用下UHPC自修复的成效,依据实际工程实例,证实多因素协同作用提升UHPC自修复性能的有效性,意在为优化UHPC自修复性能、扩大其工程应用范畴提供理论支撑与实践指引。

[关键词] 超凡高性能混凝土;自我修复功用;多因子交互影响;原料成分的组合;环境条件

超高性能混凝土(UHPC)凭借高强度、高耐久性等不凡性能,在桥梁、高层建筑、水利工程等范围的应用越发普遍,处于服役实施阶段,UHPC结构依旧会因荷载施加、环境腐蚀等因素出现微裂缝,使其实力学性能与耐久性受到影响,自修复技术为处理这一问题给出了新方案,借助赋予UHPC自动修复裂缝的能力,能有效提升结构使用年限,但多种因素对UHPC的自修复性能存在影响,深入考察多因素综合作用下UHPC的自修复性能,对充分发挥其长处、推进工程应用极具意义。

一、超高性能混凝土自修复性能概述

(一) 自修复原理

超高性能混凝土自修复主要借助物理、化学和生物三种作用机制,物理自修复讲的是裂缝受水分和空气作用的时候,内部孔隙内可溶盐结晶,凝胶物质也开始沉积,填满裂缝罅隙,化学自修复依赖水泥水化产物跟外界物质发生化学反响,制造新的胶凝物质封堵裂痕。要是裂缝和外界水分接触上,未完成全部水化的水泥颗粒持续水化,生成诸如氢氧化钙、钙矾石等产物以填充裂缝,生物自修复依靠在混凝土中添加微生物或微生物孢子实现,微生物在适宜环境下经代谢生成碳酸钙等物质,完成缝隙弥合,研究人员还发现到了一些新型自修复机制,好比形状记忆合金纤维热造成的变形修复,若混凝土温度有所升高,合金纤维形变去填充裂缝,呈现出自修复技术的多元化发展走向^[1]。

(二) 自修复性能的重要性

自修复性能极大提升超高性能混凝土的耐久性,裂缝若能及时修复,可有效阻拦水分、有害离子等侵入混凝土内部,降低钢筋因锈蚀、化学侵蚀等造成的破坏,增加结构使用年限,自修复特性利于维持UHPC结构的力学性能,杜绝因裂缝延展引发的强度下降,保障工程的安全无虞,自修复技术可削减结构的维护费用,减少因修补裂缝带来的经济与时间的耗费,采用自修复UHPC的工程于服役的阶段里,维护成本可削减30% - 40%,经济利益极为明显。

二、影响超高性能混凝土自修复性能的因素分析

(一) 原材料组成

1. 胶凝材料

UHPC自修复性能受水泥品种与用量的影响十分显著,硅酸盐水泥里C₃A与C₃S含量偏高,水化速度迅猛,早期形成的钙矾石与氢氧化钙数量多,有利于裂缝开展化学自我修复,把硅灰、粉煤灰等矿物掺合料掺入,可以改良混凝土的微观架构,提高凝胶产物的紧密性,增大自修复潜力。适量的硅灰可跟氢氧化钙进行火山灰反应,生成更多的C-S-H凝胶,填补裂缝且提升混凝土的强度,最新研究发觉,纳米二氧化硅的添入可进一步细化UHPC微观结构,纳米颗粒凭借高活性可更充分参与水化反应,生成的C-S-H凝胶结构变得更紧实,自修复产物与基体的结合粘结力更大,由此明显增进自修复成果。

2. 骨料

骨料的粒径、级配及矿物成分对UHPC自修复性能有影响,细骨料可增强混凝土流动性及密实度状况,减少孔隙占

比,为自修复创造有利条件,若粗骨料粒径过大,可能引起界面过渡区的薄弱,极易出现裂缝;精准的骨料级配可达成紧密堆积形态,减少裂缝拓展几率,某些活性骨料跟水泥水化产物进行反应,可推动自修复进程得以开展,用贝壳粉部分替代砂成为骨料,贝壳粉中的碳酸钙成分可跟水泥水化产物产生二次反应,催生更多钙矾石生成,加快裂缝修复进程节奏^[2]。

3. 外加剂

减水剂可减小混凝土的水胶比,加大密实水平,间接强化自修复的能力,膨胀剂能在混凝土硬化阶段产生适度膨胀,降低裂缝生成几率;膨胀生成的物质可填充裂缝,增进自修复的功效,引入微生物菌剂等特种外加剂,为生物的自修复搭建条件,微生物代谢产出的碳酸钙等物质可高效封堵裂缝,智能型外加剂成为研究焦点,诸如pH响应式的自修复外加剂,能依照混凝土内部环境酸碱度的不同变化释放修复成分,实现更精准贴合的自修复。

(二) 环境条件

1. 湿度

关键环境因素——湿度,影响着UHPC自修复,足够的湿度为水泥的持续水化及化学反应创造必要条件,有利于化学自修复进程的实施,处于潮湿的环境里,水分渗入缝隙推动未水化的水泥颗粒继续水化,造就更多胶凝质料填充缝隙,干燥环境可抑制自修复进程,造成裂缝不易实现愈合,最新探究表明,间歇性的湿润与干燥循环对UHPC自修复呈现双重影响,恰当的循环能促进自修复产物交替沉淀,加大修复成效,可过度循环会造成修复产物反复进行干湿收缩,弱化修复质量。

2. 温度

温度影响着UHPC自修复的化学反应速率,恰当的温度上升能加速水泥的水化及化学反应,促进自修复达成;但过高的温度会让水分迅速蒸发,引发自修复进程过早完结,于低温环境当中,水泥水化的速度十分缓慢,自修复成效欠佳,在冬季施工场景或低温区域,UHPC自修复表现大幅下滑,研究人员探索以添加温敏型材料改善低温环境自修复表现,就温敏型聚合物纤维,在低温时可减小混凝土的弹性模量,缓解因温度起伏产生的应力。

3. 侵蚀介质

诸如硫酸盐、氯离子之类的外界侵蚀介质会对UHPC自修复性能产生消极影响,硫酸盐会跟水泥水化产物起反应,生成钙矾石或石膏,引致混凝土膨胀进而开裂,损毁自修复生成物;氯离子则可侵蚀钢筋本体,造成钢筋生锈腐蚀,进一步带动混凝土裂缝延展,干扰自修复进展,置身盐渍土区域,除惯常的硫酸盐及氯离子外,镁离子同样会介入侵蚀反应,与氢氧化钙起化学反应生成氢氧化镁沉淀,弄坏混凝土内部结构,极大阻碍自修复的进程^[3]。

(三) 微观结构

1. 孔隙结构

自修复性能受UHPC的孔隙率和孔径分布影响,低孔隙度及微小均匀的孔径构造,能减少水分及有害离子侵入的路线,

为自修复赋予稳定的内部形势, 凭借优化配合比及施工工艺, 降低 UHPC 的孔隙占比, 令自修复产物更易在孔隙、裂缝里沉积, 促进修复效果, 纳米技术的施行给调控 UHPC 孔隙结构添了新手段, 纳米颗粒可把微小孔隙填充, 把平均孔径从数十纳米降到几纳米, 大幅增进自修复功用。

2. 界面过渡区

骨料与胶凝材料的界面过渡区构成了 UHPC 的薄弱环节, 其质量对自修复表现极为关键, 理想的界面过渡区可强化骨料和胶凝材料间的粘结力, 减缓界面处裂缝的萌生与延展, 凭借硅灰、纳米材料等改良界面过渡区微观结构, 可增强 UHPC 整体的自修复本领, 最新的研究证实, 采用在骨料表面涂敷纳米二氧化钛涂层, 能促进界面处化学反应的开展, 造就更紧密的过渡区结构, 让自修复产物在界面更顺利地生长, 增强界面修复的实际效果。

三、多因素影响下超高性能混凝土自修复性能研究方法

(一) 实验研究

1. 试件制备

依照研究意图, 设计各类配合比的 UHPC 试件, 调整胶凝材料组成、骨料级配、外加剂种类及其掺量等因素, 切实控制原材料计量、搅拌工艺、成型方式及养护条件, 保障试件质量呈现一致且可比状态, 在试件制备操作期间, 采用 3D 打印技术能精准调节试件内部结构和孔隙的分布, 为研究特定微观结构对自修复性能产生的影响给出新途径。采用机械加载、温度转变、化学腐蚀等途径让试件产生裂缝, 将有裂缝的试件置于各类环境条件里, 诸如不同的湿度、温度与侵蚀介质状况, 留意自修复进展, 按周期记载裂缝宽度的变动, 依靠显微镜、扫描电镜 (SEM) 等手段对裂缝内部结构和自修复产物进行分析, 运用高分辨率 CT 扫描技术开展裂缝修复过程的动态监测, 能完成对裂缝内部三维结构变化的非破坏性检测, 明白展现自修复产物的生长轨迹^[4]。

2. 性能测试

对修复好的试件开展力学性能试验, 如实施抗压强度、抗折强度测试, 估量自修复对 UHPC 力学性能的恢复水平, 实施耐久性试验, 好比开展抗渗性、抗氯离子渗透性测验, 评判自修复后混凝土抵抗环境侵害的能力, 另外实施了疲劳性能测试操作, 研讨自修复在循环荷载作用状态下对 UHPC 性能的影响, 为其在实际工程应用中提供更为全面的数据支撑。

(二) 理论分析

1. 数值模拟

采用有限元软件构建 UHPC 自修复过程的数值模型, 顾及多因素耦合协同效应, 仿真裂缝扩展及修复的过程, 输入差异化的材料参数、环境条件及边界条件, 探析各因素对自修复性能的影响机理, 揣度自修复的效果, 随计算机技术飞速发展, 多物理场耦合模拟跻身研究热点之列。

2. 机理研究

综合实验结果与微观研判, 深入探索多因素影响背景下 UHPC 自修复的作用原理, 采用 X 射线衍射 (XRD)、红外光谱 (FTIR) 等技术, 审定自修复产物的组分与架构, 弄清楚自修复过程中的化学反应原理, 采用原子力显微镜 (AFM) 及分子动力学模拟技术, 可从原子、分子维度研究自修复进程, 为阐释自修复机理赋予更微观的洞察。

四、多因素影响下超高性能混凝土自修复性能应用案例分析

(一) 案例背景

有一座跨海大桥采用超高性能混凝土建桥墩, 服役阶段面临海洋环境腐蚀及荷载作用的双重挑战, 为增强桥墩的耐久性, 研发团队针对多因素影响下的 UHPC 自修复性能展开研究, 继而把成果应用于工程实际。

(二) 应用过程

1. 配合比优化

按照海洋环境特点, 修正 UHPC 配合比, 提升硅灰及粉煤

灰的添加量, 改善混凝土的密实状况及抗氯离子渗透能力; 掺入膨胀剂及微生物菌剂, 增强混凝土自修复能力, 凭借大量实验摸索, 抉择出最优配合比, 在开展实验期间, 对不同配合比下 UHPC 的工作、力学及自修复性能数据做了详细记录, 譬如坍落度、抗压强度、裂缝闭合时间等, 为配合比优化构建了可靠的数据支撑。

2. 施工工艺控制

切实控制 UHPC 的搅拌时间、浇筑速率及振捣工艺, 维持混凝土均匀与密实的属性, 在养护实施阶段, 采取保湿养护跟加热养护相结合之法, 为自修复搭建适宜的湿度温度基础, 采用智能监测系统对施工过程的各项参数实时监控, 诸如温度、湿度、混凝土内部实际应力等, 即刻调整养护办法, 保障自修复过程顺利实施。

3. 监测与评估

在桥墩的表层安置传感器, 实时观测裂缝生成及发展情况, 按期对桥墩开展无损检测, 考量自修复成效, 借助对比修复前后的力学及耐久性指标, 证实多因素协同作用提升 UHPC 自修复性能的有效性, 除普通的检测手段外, 也采用光纤传感技术监测桥墩内部应变及温度的改变, 为评估自修复对结构性能造成的影响提供更翔实的数据。

(三) 应用效果

历经三年服役阶段, 桥墩表面裂缝的数量及宽度大幅减少, 自修复效果极为突出, 检测结果呈现, 修复后的桥墩, 抗氯离子渗透力提高了 40%, 抗压强度的恢复率达到 90% 以上水平, 再深入的微观剖析揭示, 自修复产物于裂缝之中均匀铺排, 与基体紧密结合, 有效拦截了有害离子的侵入。依靠长期监测探明, 采用自修复 UHPC 的桥墩承受着海浪冲击和潮汐变化等复杂荷载的作用, 结构疲劳寿命约延长至原来的 120%, 充分彰显了多因素协同优化自修复性能对增强工程结构服役性能的关键意义。

结语

诸多要素对超高性能混凝土自修复性能呈现复杂且相互的影响, 原材料组成界定了 UHPC 自修复的物质基础, 环境条件制约自修复过程的开展, 微观结构为自修复给予内部环境, 借助实验研究跟理论分析相结合的途径, 可深入探索各因素的作用机理与交互影响规律, 实际工程实例证实, 结合多因素对 UHPC 自修复性能进行优化处理, 可极大增进结构的耐久性和使用年限。

随着纳米技术、智能材料与生物技术的不断进步, 针对 UHPC 自修复性能的研究将朝更智能高效方向前行, 进行具备自感知、自调节性能的智能自修复材料开发, 让其可依据环境改变与结构损伤状况自动开启修复机制; 深度剖析多因素协同作用的微观机制, 依靠多尺度模拟及实验证明, 制定更精准的自修复性能预测模型。UHPC 自修复技术大规模应用依旧面临一些挑战, 增进产学研合作力度, 推动自修复 UHPC 于更多工程领域应用拓展, 构建完备的设计、施工及验收标准, 定是未来该领域关键的发展走向, 应进一步摸索经济高效的自修复技术, 减少应用成本支出, 基于长期的工程实践及监测行为, 汇聚数据来估量修复效果的长期可靠性, 以此为 UHPC 自修复技术的大规模应用筑牢根基。

[参考文献]

- [1] 黄伟, 孙伟. 石灰石粉掺量对超高性能混凝土水化演变的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(4): 751-759.
- [2] 水月亮. 超高性能混凝土抗压强度尺寸效应及收缩特性[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 632-637.
- [3] 周晓光, 王哲. 围压及粗骨料对超强混凝土抗压性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(12): 144-152.
- [4] 杨简, 陈宝春, 吴香国, 等. 新拌超高性能纤维增强混凝土流动性能对其抗压强度的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3827-3837.